Background Paper

CANADIAN INSTITUTE FOR INTERNATIONAL PEACE AND SECURITY

Number 7

September 1986

SATELLITE SURVEILLANCE AND CANADIAN CAPABILITIES

by Ronald Buckingham

HISTORY OF REMOTE SENSING AND SURVEILLANCE

In 1959, the US satellite Explorer-6 transmitted the first known photograph of the earth taken from space. A year later, in April 1960, the first of the TIROS weather satellites was launched into space and began feeding meteorological data to the earth. Its circular orbit was at an altitude of 830 kilometres, which is typical for a remote sensing mission. TIROS-1 lasted only 89 days, and the image resolution from its two TV cameras was only one kilometre, but it confirmed that earth observation by satellite had great potential. With succeeding spacecraft, each with better instrumentation, the public soon became familiar with satellite weather reporting.

In the US manned space programme, the Mercury astronauts had taken intriguing pictures with hand-held cameras and subsequently, in June 1965, the first systematic photography of the earth's surface was begun by Gemini astronauts J.A. McDivitt and E.H. White. The usefulness of their initial 39 overlapping area colour photographs prompted a continuing Gemini, and later Apollo and Skylab, remote sensing programme.[1]

During that time the US and USSR had also been developing national security satellite surveillance technology ("Surveillance" is the military's equivalent to the scientific community's "remote sensing".) Airborne surveillance had its start in 1859 when aerial photographs were taken from a balloon, near Paris. The new technology was first applied just a few years later, in the US civil war. Photo-reconnaissance became a sophisticated craft in subsequent wars and significantly, for the yet-to-come satellite era, imaging radar and colour infrared photography were developed during World War II.[1] In 1956 the US began U-2 photo-reconnaissance overflights of the USSR and these continued until May 1960 when Francis Gary Powers was shot down by a Soviet missile at 70,000 feet. While this was a headline event, the fact is that over forty other US and allied reconnaissance aircraft had been shot down since the late 1940's.[2] The cessation of the U-2 flights coincided with the maturation of satellite technology, which was believed to be more useful for three reasons: satellites were then invulnerable to attack, they could cover larger areas, and they were not as provocative as manned aircraft overflights. In March 1955—two years before Sputnik—the US had embarked on a CIA-sponsored programme to develop satellite surveillance technology. The first reentry film package was recovered from the Discoverer 13 satellite on 11 August 1960. As John Kennedy began his presidency the alleged "missile gap" between the US and USSR was proven untrue by surveillance. By 1963, both "area surveillance" photos and "close look" photos were being obtained. The USSR's Kosmos programme began during that same era, and we can speculate that the quality of information was similar to that of the US. American and Soviet technological capabilities in surveillance gave both nations the confidence to enter the Strategic Arms Limitation Treaty (SALT) negotiations in 1969.[3]

The parallel development of surveillance and remote sensing technology continued. In the US, information on the technology was shared, subject to security classification, between NASA and the Air Force. The USSR does not divide its space efforts into civilian and military agencies.

By 1971 the US was flying 20,000-pound "Big Bird" surveillance satellites in near-polar orbits, typically with apogees (the highest point of the orbit) at 290 kilometres and perigees (the lowest point of the orbit) at 180 kilometres. At these low altitudes such

87-03152/

large objects reenter the atmosphere quickly due to air drag; the lifetimes of the first three "Big Birds" were 52, 40 and 68 days respectively, while the USSR's equivalent spacecraft lasted an average of two weeks each! Consequently the USSR launched 395 surveillance satellites between 1960 and 1977, while the US launched 227.[2] It was after the July 1966 launch of the KEYHOLE-8 (KH-8) "close-look" inspection satellite, that the US reportedly believed its photographic images were sharp enough to consider the possibility of monitoring arms agreements. In December 1976 the US's first electronic-imaging photo-reconnaissance satellite, KH-11, was launched. It was also the first to transmit its images to earth by digital telemetry and its orbit could be adjusted using an on-board propulsion system. Consequently the satellite's lifetime was dramatically improved, with some KH-11's lasting for over two years.

Throughout the 1970's and up until the recent Shuttle and Titan losses, the US continued launching Big Bird and KH-11 satellites. During the same period the "Rhyolite" and "Chalet" series of geostationary satellites for intercepting communications also became operational.[4] The US may currently be flying spacecraft with high-resolution imaging radars, as part of the "Clipper Bow" programme, which was reported to have begun in 1983[5], although this has not been confirmed.[4] The next generation surveillance satellite is KH-12, which is so large it will fill the entire Space Shuttle. It will have both close-look and area-surveillance capabilities, and it will also carry infrared imaging instruments.[4]

During the 1970's the USSR reportedly used surveillance satellites which returned film to the earth, however they are currently using electronic imaging with signals that are digitally transmitted to earth. In addition, the USSR has two constellations of communications-interception satellites, operating in near-earth orbits.[4]

For civilian applications, the US developed the Earth Resources Technology Satellite (ERTS) in the late 1960's, and in 1972 the first ERTS satellite, renamed "Landsat", was launched.[1,6] This was the beginning of a very successful programme that today provides information to subscribers in many countries. Seasat, launched in 1978, demonstrated the potential for oceanographic imaging radar. The USSR's nuclear powered Kosmos 954, which broke up over Canada in January 1978, was also equipped with an ocean-imaging radar.[5] The most recent remote sensing system is France's "Système Probatoire d'Observation de la Terre" (SPOT) which was launched in February 1986 and is now providing the highest resolution imagery available commercially.[6,7]

CANADIAN SPACE TECHNOLOGY

On 28 September 1962, a US Thor-Agena rocket launched a Canadian satellite from Vandenberg, California. Canada became the third nation into space, after the USSR and the US. The first four Alouette and ISIS satellites were used for scientific research. They featured radar-like instruments called "topside sounders" to study the physics of the radio ionosphere. Canadian capability in space technology subsequently flourished through the 1970's and 80's, within both government and a maturing private sector high-tech industry. Preceded by work under the Department of National Defence (DND), the Department of Communications (DOC) developed communications satellite technology and Canada became a world leader. Telesat Canada began operating the world's first domestic system in January 1973 with the launch of ANIK A. During this same period, Canada's National Research Council (NRC) fostered the development of Canadian space science instruments, the Canadarm, our astronaut programme and our current role in the US Space station.[8] Canadian universities, such as York, Calgary and Saskatchewan developed space science excellence, but, as part of NATO and NORAD, Canada relied on US satellites for surveillance and early warning.

An active Canadian remote sensing community also developed during this time, spawned by the needs of a large land, rich in resources. In May 1971 Canada and the US began a cooperative programme using aircraft, and subsequently spacecraft, for remote sensing. Within government, the Canada Centre for Remote Sensing (CCRS)—part of the Department of Energy, Mines and Resources—fostered the development of remote sensing technology and promoted the growth of the industry in four areas: instrument development, surveying, ground processing of data and application of remote sensing to diverse economic sectors. Today Canadian products, particularly image processing systems, are sold throughout the world and the Canadian Remote Sensing Society is an internationally recognized organization with over 600 members.

There is no inherent difference between national security surveillance technology and remote sensing technology. The types of instruments, the design principles and many of the components are identical. The differences are of degree: surveillance programmes generally require higher resolution, the instruments are often physically larger and they require more electrical power and larger launch vehicles. For surveillance missions the ground processing and data analysis can require more labour and equipment, and the required "turn-around"

time between the acquisition of the data and its analysis on the ground is likely to be shorter. For both sectors, earth observation satellites can be divided into six categories based on their function:

- remote sensing of the earth and oceans for scientific and commercial uses
- national security (military) surveillance
- early warning
- meteorology
- navigation, positioning and surveying
- treaty verification surveillance

VERIFICATION

"Verification with regard to weapons that are destroyed or limited would be carried out by both national technical means and through on-site inspections. The USSR is ready to reach agreement on any other additional verification measures."

—Mikhail Gorbachev
16 January 1986[4]

Verification has been an underlying—and possibly the most important—issue in negotiating arms limitation, test ban, non-proliferation and other types of treaties. The signing of the Limited Test Ban treaty in 1963 demonstrated that "National Technical Means" (NTM) had been developed to such a degree that both the US and USSR felt confident that they could detect non-compliance with the treaty. The Non-Proliferation Treaty (NPT) was signed in 1968 and by 1985 there were 130 signatories, including Canada and three of the nations possessing nuclear weapons: the US, the USSR, and the UK. The two other nuclear states, China and France, have not signed the treaty. Nor have many "near-nuclear" states such as Israel, India and Pakistan.[9]

At the same time as the signing of the NPT, the US and USSR agreed to begin negotiating a Strategic Arms Limitation Treaty (SALT). In 1972 the Anti-ballistic Missile (ABM) Treaty and the Interim Agreement on Offensive Arms were signed.[2] The successor treaty, SALT II, became effective in June 1979, although the US Congress never ratified it. SALT II formally expired on 31 December 1985, but both countries agreed to continue adhering to its general terms. Under SALT II the US and USSR agreed to ceilings on specific weapons types based on the 1974 Vladivostok understanding between President Carter and Chairman Brezhnev. Strategic nuclear delivery systems such as heavy bombers, intercontinental ballistic missiles (ICBMs), submarine-launched ballistic missiles (SLBMs), and air-to-surface missiles were limited by number.[2,3,10]

Technical means of verification include surveillance satellites, aircraft surveillance, listening posts and terrestrial instruments such as seismic sensors and radars. Non-technical means include on-site inspection plus methods such as economic analysis, content analysis of documents and speeches, interviews with travellers and emigrés and clandestine activities. The most reliable approach is to obtain data from multiple sources.

There are four problems associated with technical verification: the physical limitations of the technology, the capability to detect purposely hidden activities, protection if one party tries to confound or destroy the other's surveillance system, and finally—and perhaps most difficult—the objective interpretation of the data.

A good case can be made for the creation of an impartial surveillance programme, administered and staffed by people from countries other than the two superpowers. There have been several calls for such an organization. For example during the UN Special Session on Disarmament in 1978, France proposed the establishment of an International Satellite Monitoring Agency (ISMA), to operate under UN jurisdiction.[11] Similarly, in 1985, (US) Admiral Stansfield Turner—a former director of the CIA—proposed that the United States' technical surveillance information be made more widely available. He suggested the creation of an "Open Skies Agency", taking its name from President Eisenhower's 1955 proposal.[12] Even without such an agency, we are now aware of the existence and general capabilities of some of the US surveillance satellites, which up until a few years ago were totally classified. A group of six nations—Argentina, Sweden, Mexico, India, Tanzania and Greece—has offered to jointly administer an international monitoring programme.[4] In Canada the Department of External Affairs is sponsoring a study on a potential ground and space verification satellite system named PAXSAT. While not yet completed, the study will probably recommend a Canadian satellite equipped with a high resolution radar and imaging instruments, supported by a sophisticated ground system.[13]

WHAT AND WHO SHOULD BE OBSERVED?

Because the SALT treaties concerned strategic threats, "targets" such as ICBMs, strategic aircraft, SLBMs and launch facilities were the main subjects for verification. ("Target" is used, without innuendo, to denote the object being observed.) A more comprehensive verification programme would include observation of naval vessels, radar sites, chemical and biological weapons production, stockpiling,

military installations, military land vehicles, and weapons facility construction. It would also be important to identify changes from one observation pass to the next, in order to identify a process or motion. Cruise missiles should also be observed. Current remote sensing technology is capable of observing them on the ground, but, because of their mobility and small size, they can easily be hidden in conventional-looking buildings. Furthermore, they require a much smaller "logistics trail" than ICBMs. Thus the cruise missile verification issue is controversial and probably cannot be addressed solely by technical means.[4,10] A number of other targets have been recommended; for example, nuclear reactors and uranium enrichment facilities could be observed to ascertain compliance with production limits of fissile material for nuclear weapons.[14]

Satellites with sensitive receivers that are able to cover large portions of the communications spectrum and large, high-gain antennas can intercept or "eavesdrop on" ground-to-ground and ground-to-space communications. While an international verification organization could technically do this, unless all parties—including the two superpowers—agreed to such monitoring it would not be practial diplomatically. In addition, there would be severe technical challenges due to the sophistication of equipment and the resources required to process and decode the data.

Any surveillance system for the late 1980's and 90's must be designed with the recognition that the environment which led to the treaties of the 1960's and 70's has changed. Monitoring strategic arms limitations and test bans between the US and USSR is still vital, but other targets must also be covered. Many nations and groups have increased their potential for initiating world crisis through limited military action, weapons build-up, guerrilla activity and terrorism. Consequently the system would have to be capable of observing all areas of the world, and objective presentation, interpretation and distribution of the data would be crucial.

WHAT DATA AND RESOLUTION ARE REQUIRED?

For some surveillance tasks it is adequate to detect merely the presence of an object or activity, while others require identification or even assessment of the target's dimensions. Table 1 shows the ground resolution (in metres) required for various targets, considering different tasks.[2]

Observing troop movements, especially in small groups, requires more precise resolution than for vehicles. For many targets "spectral" resolution (the ability to differentiate between particular wavelengths of light or other electromagnetic radiation) is as important as "spatial" ground resolution. Infrared detectors must be able to distinguish differences in temperature levels which are meaningful to the process under observation, and this usually requires resolution on the order of a few degrees.

TABLE 1 Resolution (in metres) Required for Different Verification Tasks

	TASK		
TARGET	*Detection*	*General Identification*	*Description*
Radar	3	1	0.15
Aircraft	5	1.5	0.15
Surface ships	8	5	0.3
Vehicles	1.5	0.6	.06
Roads	9	6	0.6
Submarines	30	6	0.6
ICBMs	3	1.5	0.3
SLBMs	30	6	1
Cruise missiles (estimated)	1.5	0.6	.06

FUNDAMENTALS OF A SATELLITE VERIFICATION SYSTEM

There are six key elements of a verification system:

- satellites
- satellite control and tracking station
- data receiving station
- data processing centre
- analysis and interpretation group
- information distribution network

The number of satellites and orbit selection is a trade-off among coverage requirements, resolution requirements, system lifetime and cost. Polar orbits have been used most often for surveillance missions because they allow coverage of the entire earth. Depending on the instruments' field(s)-of-view and the orbit altitude it usually takes several days, or even weeks, to observe everything. Other orbits such as equatorial and inclined elliptical orbits are useful for specific requirements. For example the USSR frequently uses "Molniya" orbits which are elliptical, inclined at sixty-five degrees or so, and have their apogees in the Northern hemisphere; they allow a good view of the North. As more satellites are added to the system, the time between repeated viewings of targets decreases and, depending on the orbits chosen, the global coverage can improve. With any orbit, instrument resolution improves if the altitude is lower; however the coverage area—or "swath width" per satellite pass—decreases, as does lifetime. As noted earlier, photo-reconnaissance satellites have very low orbits and short lives but they can

produce pictures with resolution of less than ten centimetres. At the other extreme, geostationary satellites with orbits of 36,000 kilometres—used for meteorology, early warning, navigation and communications—provide coverage of almost the entire earth, but picture resolution is on the order of one kilometre.

A simple satellite with ordinary instruments can cost fifty to a hundred million dollars and the launch cost can be in the same range. Satellites with complex instruments (such as large radar antennas) can cost many times more. The price of a KH-11, for example, is reportedly five hundred million US dollars per satellite.[4] Electrical power requirements strongly affect a satellite's size and cost. Large instruments can require thousands of watts of power, usually derived from large solar arrays or nuclear reactors. A surveillance spacecraft must be stabilized very precisely, because stability affects its instruments' resolution. Therefore complex and expensive attitude control systems are often needed for large spacecraft.

Surveillance missions provide a large amount of raw data. For example, SPOT has a telemetry stream of 50 megabits per second. Once on the ground, this data is processed into a useful format using specialized software. Depending on the application, the computing equipment needed can range from a personal computer to a high speed mainframe with array processing capability. For many surveillance tasks it is not necessary to process the data in "near real time", as it is for an early warning satellite system.

Analysis and interpretation are critical, and the techniques developed for remote sensing are applicable for surveillance and verification missions as well. As mentioned previously the use of multiple instruments, multiple modes of operation of these instruments and multiple means of technical and nontechnical verification, leads to the most objective and accurate interpretation. After processing the data, it has to be efficiently transmitted, or made available on demand, to individuals and organizations who need it. Scientific projects, such as NRC's CANOPUS, have shown that dedicated computer networking works well. A dedicated communications satellite (such as Anik) channel can be utilized to transmit this computer-to-computer data.

FUNDAMENTALS OF EARTH OBSERVATION INSTRUMENTS

Satellite and airborne instruments are similar to those used on earth. The differences are chiefly in the design details and materials chosen, not the operational principles. Almost all remote sensing instruments operate by sensing some form of electromagnetic radiation, such as visible light, infrared heat, or telecommunications signals. These energy-bearing electromagnetic waves all travel at the same velocity in the vacuum of space—the speed of light (3×10^8 metres per second). A wave therefore can be pictured as travelling through space while oscillating sinusoidally.

There is a simple relationship between a wave's frequency* and wavelength:**

$$\text{wavelength} = \frac{\text{speed of light}}{\text{frequency}}$$

Consequently, since the speed of light remains the same, a particular electromagnetic wave—for example a radio signal—can be described equally unambiguously by stating either its wavelength or its frequency.

Table 2 shows the regions of the electromagnetic spectrum, categorized according to wavelength, and the types of instruments which are used for surveillance and remote sensing:

TABLE 2 The Electromagnetic Spectrum and Typical Instruments

Wave Type	*Wavelength*	*Instrument Types*
radio	10 km-20 cm	receivers, sounders
microwave	20 cm-0.1 cm	receivers, radars, sounders, radiometers, scatterometers
infrared	1 cm-0.75 μm	imagers, detectors, radiometers
visible	0.75 μm-0.4 μm	optics, lasers, lidars
ultraviolet	0.4 μm-3 nm	imagers, spectrometers
X-Rays	3 nm-.03 nm	detectors, spectrometers
gamma rays	1 nm and shorter	detectors, spectrometers

*Frequency is the number of cycles of wave oscillation in a given time, and one cycle per second is defined as one "Hertz." The prefixes kilo-, mega-, and giga- refer to one thousand (10^3), one million (10^6) and one billion (10^9) Hertz respectively.

**Wavelength is the physical length of a complete propagating wave cycle and it is usually expressed in metric units, such as metres, centimetres (cm.) and kilometres (km.). A millimetre (mm.) is one thousandth (10^{-3}) of a metre, a micrometre (μm.) is one millionth (10^{-6}) of a metre and a nanometre (nm.) is one billionth (10^{-9}) of a metre.

In physical terms, instruments utilizing wavelengths larger than a tenth of a centimetre or so are primarily "electronic" and they intercept and emit signals using antennas; in the range below a tenth of a centimetre down to fifty nanometres or so, instruments are primarily "optical" utilizing both geometric and diffraction optics techniques; and as wavelengths become even shorter, instruments rely on particle physics, recording the interaction of discrete waves/particles with the sensor material. Only those waves not absorbed by the earth's atmosphere can be utilized to observe the earth's surface from a satellite. These regions of the spectrum are sometimes called "windows". Visible light, thermal infrared waves (with a wavelength centred around ten micrometres), most microwaves, and the longer ultraviolet waves pass through these "windows".[15]

Instruments can be categorized as:

- detectors or imagers
- active or passive

A *detector* indicates the presence of some intensity of electromagnetic radiation at some wavelength(s), but it doesn't explicitly give spatial information. The motion of the satellite or aircraft can however be used to create low resolution detector images, and for many surveillance applications this is adequate. Radiometers are examples of detectors. An *imager* can be thought of as a detector which also explicitly obtains information about the target's spatial features which can subsequently be processed into a picture. An example of an imager would be a camera.

Passive instruments intercept waves that originate independently from the target. Examples are cameras, telescopes, radiometers and spectrometers. An *active* instrument, on the other hand, first emits a wave toward the target and then consequently receives a returning wave which contains the desired information. Radars, lidars and electromagnetic sounders are examples of active sensors.

SPACEBORNE INSTRUMENTS AND CANADIAN CAPABILITIES

Visible region optical instruments

This category includes telescopes, cameras, spectrometers and interferometers. Picture resolution is defined as the smallest interval on the ground that can be distinguished by the instrument. It is usually limited by the imaging surface's ability to differentiate detail—no matter how precise the optical components may be. For electronic imagery, Charge Coupled Devices (CCDs) or similar solid state microchips are used. A CCD is retina-like and its imaging surface has on the order of 1000 by 1000 individual facets called "pixels", arranged in a rectangular matrix pattern. The resolution of these instruments is governed by the CCD's pixel size which is generally between five to thirty micrometres. Similarly, in a conventional camera it is the "graininess" of the film which limits the system's resolution.

The spatial resolution (r) of an optical instrument is determined by the distance between the target and the instrument's imaging surface (h), the pixel, or film grain, size (d), and the focal length (f), according to the following geometrical relationship:

$$r = \frac{h \times d}{f}$$

As an example, if a verification satellite were at a 400 kilometre orbit altitude, and if a CCD with 10 micrometre-sized pixels were used in its instrument, then target resolution of one metre could be obtained if the instrument had a four metre focal length. This is large but feasible, and consistent with the sizes used for spy satellites. If a "folded optics" design were used the overall physical length could be less. Variations in the earth's atmosphere, spectral effects, reflection losses and other phenomena impose practical limits on the resolution which is geometrically possible.

Canada has industrial, academic and government research capabilities in optics. For example a number of private companies build precision optics components, and several universities, such as Laval (Quebec), are well known for optics research. The NRC's Dominion Observatory (Victoria) is one of several institutions that has developed complex land-based optical systems, including a laser system targeted at the moon, a portable astronomy system for Saudi Arabia and participation in the 3.6 metre Canada-France-USA telescope located on Hawaii's Mauna Kea. Under contract to NRC, an Ottawa firm has developed an advanced ultraviolet (UV) imaging CCD camera system for Sweden's Viking spacecraft which, launched in February 1986, is now yielding the most detailed ultraviolet pictures yet obtained of the Aurora Borealis. At present a Western Canadian firm is developing a Wide Angle Michaelson Doppler Imaging Interferometer (WAMDII) scheduled for a Shuttle science mission. Two Ontario firms, in collaboration with France, are teamed to develop a large Wind-Imaging Interferometer (WINDII) for flight on NASA's Upper Atmosphere Research Satellite (UARS), which is scheduled for a Shuttle, or Titan, launch in the late 1980's.[6] Numerous Canadian companies market ground and airborne optics instruments.

Synthetic Aperture Radar (SAR)

An imaging radar differs from a detection-only type radar in that the transmitted beam is relatively narrow, and the wave reflected from the target is

received by the antenna in such a way that a picture of the target is obtained. A conventional imaging radar's resolution depends on the wavelength of the energy emitted, the length of its antenna, and the distance of the antenna from the target. Side Looking Airborne Radars (SLARs) have been used extensively in airborne remote sensing. However this type of imaging radar is not practical for a satellite because the antennas would have to be kilometres long in order to identify targets consistent with surveillance requirements. Synthetic Aperture Radar overcomes this problem by utilizing a clever signal processing procedure whereby the Doppler shift of the returning radar wave is used in conjuction with the velocity and orbit position data of the spacecraft, and consequently the effective length, or aperture size, of the antenna appears to be orders of magnitude larger than its physical dimension. A SAR-equipped surveillance spacecraft with an antenna ten to twenty metres long would be able to perform many surveillance tasks because it could provide resolution on the order of one to five metres.[1]

Radar waves penetrate clouds, and the instruments can be used night or day. The first SAR to confirm the potential of imaging the earth from a satellite was SEASAT A, which in its short lifetime gave us a wealth of data on ocean characteristics. Right now Japan and Europe are both developing SAR equipped space missions for commercial remote sensing.

Table 3 summarizes several noteworthy SAR missions:[1,6]

TABLE 3 Satellites with Synthetic Aperture Radars

Mission	*Radar Characteristics*
NASA's SEASAT, launched in June 1978 into an 800 kilometre orbit; it mapped 95% of the world's ocean every 36 hours	L-band*** SAR with a 2.1 by 10.7-metre antenna, yielding resolution of 25 metres by 6 metres along a 100-metre wide swath
Shuttle Imaging Radar (SIR-A), flown in 1981	Modified SEASAT SAR with a 9.4-metre antenna, yielding resolution of 40 metres
European Space Agency's ERS-1, to be launched in 1989 into a 777-kilometre orbit, to provide 36-hour full-earth coverage	C-band SAR with a 1.0 by 10-metre antenna, requiring 4.8 kilowatts of peak power, to yield 30 metre resolution
Japan's ERS-1 (same name) to be launched in 1991 into a 570-kilometre circular orbit	L-band SAR with a 2.4 by 12 metre antenna, requiring 1.0 kilowatt of power, to yield 25 metre resolution

Over the past ten years Canada has been planning Radarsat which was to be a SAR-equipped remote sensing satellite. Generally, the studies recommended a high inclination circular orbit at an altitude between 800 to 1000 kilometres, SAR operation at 5.3 Gigahertz (C band), and ground resolution around 25 metres with a ground swath of approximately 200 kilometres, multiple beams, and a steerable antenna.[6] In May 1986 the Minister of Science and Technology announced that the programme was losing government financial support and industry was challenged to develop a strategy to finance it from the private sector. This activity is now underway. On the other hand, the designs and technology which were developed will also be useful for any derivative programme, including that of a verification mission. Aside from Radarsat, Canada is participating in the European Space Agency's (ESA) ERS-1 program by providing the SAR's ground processing system.

On the airborne side, CCRS contracted a British Columbia firm to develop one of Canada's first SAR systems and it is now being used on CCRS's Convair 580 research aircraft.[16] Side Looking Airborne Radars (SLAR's) have been used extensively in Canada and a number of commercial organizations have developed applications methodology and provide airborne remote sensing services. Other Canadian companies design and build world leading, high performance SLARs.

Multispectral Scanners (MSSs)

These instruments are the mainstay of present remote sensing satellite technology. They are basically electronic cameras which operate in the visible light to near-infrared region, utilizing a number of discrete spectral bands. The motion of the satellite or aircraft is used to sweep the field of view of the MSS over the target. A scanning mirror can also be used. The target is viewed simultaneously in each band, and after data processing, an effective "colour" image is produced. Very often false colours are used to aid interpretation.

Commercial multispectral scanning from satellites began with Landsat A. Landsat's imagery is familiar because of its beauty; Landsat pictures appear frequently in magazines such as *National Geographic*. The programme was transferred from NASA to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and within the past year was taken over by EOSAT, a private sector corporation. Landsat D, the most recent in the series, has a

*** "L-Band" designates microwaves with wavelengths in the neighborhood of 20 centimetres and "C-Band" designates wavelengths in the neighborhood of 5 centimetres.

four band multispectral scanner covering the visible light regions plus a newer type of MSS instrument, called a "Thematic Mapper" which is specifically designed to highlight particular classes of target, such as crops, forests, etc. Landsat's MSS resolution reportedly could have been better, but the Pentagon imposed restrictions on NASA.[4]

France's SPOT was conceived as a commercial venture from its start, following an initial non-recoverable investment from the government.[7] SPOT provides higher ground resolution than Landsat and its two MSSs are able to pivot to point sideways. SPOT can therefore produce stereoscopic images of targets, but it lacks Landsat-D's spectral range. Planning is underway for improved SPOT satellites, and depending on the commercial success of the venture, these spacecraft should be in orbit in the early 1990's. For verification purposes, it is significant that SPOT and Landsat data are available to anyone in the world.

Table 4 details the characteristics of the instruments on these two satellites:[1,6]

TABLE 4 Satellites with Multispectral Scanners

Mission	*Instrument Characteristics*
EOSAT's Landsat D in a 700 kilometre, circular, near-polar orbit; launched in March 1984 (two instruments)	Four band MSS, covering 0.5 micrometres to 1.1 micrometres, with a ground resolution of 80 metres; and Thematic Mapper, which is a seven-band MSS ranging from 0.45 micrometres to 2.35 micrometres, with a ground resolution of 30 metres
France's SPOT in an 832 kilometre, near-polar orbit; launched in Feb. 1986	Three band instrument covering the visible light regions from 0.51 to 0.89 micrometres, two MSSs, 20 metre resolution for multi-spectral imagery and 10 metre resolution for black/white imagery

Canada has developed a number of airborne scanners. For example, CCRS contracted development of the Multidetector Electro-optical Imaging Scanner (MEIS) which, using 1728 discrete detector elements, each with its own lens, has provided one metre resolution over a range of eight spectral bands.[15] Furthermore, the Department of Fisheries and Oceanography contracted the design and construction of a Fluorescent Line Imager (FLI) which is currently being used to determine plankton concentrations. The airborne FLI is planned to be a forerunner of a space borne version.

Laser Instruments

Lasers are active instruments which produce a narrow beam of coherent light, usually in the visible region, though there are ultraviolet and infrared lasers. One of the advantages is that laser light has minimum dispersion, so an emitted beam remains thin throughout its journey. LIDARs ("Light Detection and Ranging") are laser instruments used for depth profiling and altimetry.[6]

Canadian industry is world class in certain areas, particularly commercial and research CO_2 lasers and airborne Lidars. A Canadian firm developed a laser bathymeter, which is currently being used to map the precise depths of our inland and coastal waters. Laser altimeters have also been developed. Laser research has been done by Canadian government research laboratories such as NRC and the Department of National Defence (DND) laboratories.

Infrared (IR) Region Instruments

Infrared detectors and imagers have wide application in verification. They can be used day or night. The US (and presumably the USSR) use them for military surveillance since, more than any other sensor, they identify a process as well as an object. Thus an aircraft or missile in flight, a moving land vehicle, a moving ship—anything that emits significant heat—may be observed with an infrared sensor. NASA's Heat Capacity Mapping Mission (HCMM) satellite was launched in April 1978, and from a 620 kilometre orbit its (non-imaging) Infrared Mapping Radiometer provided approximately 600 metre resolution, utilizing solely the motion of the spacecraft.[1] Since then spacecraft imaging infrared detectors have been developed which provide much better resolution. One aspect of these instruments is that the detector element has to be maintained at cryogenic temperatures so that it doesn't respond to its own heat instead of the target. Canada has not flown spaceborne infrared instruments, but has used them extensively for airborne surveillance of buildings and processes. Several Canadian firms design and build high quality airborne infrared instruments and one aerospace firm is a major supplier of military infrared sensors for shipboard use.

Ultraviolet (UV) Instruments

These instruments have limited application for a surveillance mission because the shorter UV waves are absorbed by the earth's atmosphere. However certain physical processes emit UV in the longer wavelength "windows" and these can be detected. Canada has built ground based UV instruments, for example at the University of Saskatchewan, and as mentioned Canadian industry developed the highly successful UV cameras for Sweden's Viking spacecraft.

NOTES

1. Colwell, Robert N. (ed.), *Manual of Remote Sensing*, Vol I, American Society of Photogrammetry, Falls Church Virginia, 1983.
2. Potter, William C., *Verification and SALT*, Westview Press, Boulder, Colorado, 1980.
3. Greenwood, T., "Reconnaissance and Arms Control," *Scientific American*, February 1973.
4. Adam, John A. *et al.*, Special Report, "Verification: Peacekeeping by Technical Means," *IEEE Spectrum*, Vol. 23, No. 7, July 1986.
5. Bertram, Christoph, *Arms Control and Military Force*, International Institute for Strategic Studies, Gower Publ. Co., UK, 1980.
6. Schnapf, Abraham (ed.), *Monitoring Earth's Ocean, Land and Atmosphere from Space: Sensors, Systems and Applications*, Vol. 97, in AIAA Series: Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA (publ.), New York, 1985.
7. Jaques, [illegible] Lopez, R., "Looking Down for Money," *Space Markets*, Interavia Publications, Summer 1986.
8. Hartz, T., Paghis, I., *Spacebound*, Canadian Government Printing Centre, Ottawa, 1982.
9. Epstein, William, *Reviewing the Non-Proliferation Treaty*, CIIPS Background Paper No. 4., Ottawa, 1986.
10. Hafemeister, D., Romm, J., Tsipis, K., "The Verification of Compliance with Arms Control Agreements," *Scientific American*, March 1985.
11. Jasani, Bhupendra, "Arms Control and Conflict Observation Satellites," *Space Policy*, Vol. 1, No. 4, November 1985.
12. Turner, Stansfield, "Opening the World's Skies for Mankind," *Space Policy*, Vol. 1, No. 4, November 1985.
13. "PAXSAT," SPAR Aerospace brochure, 1985.
14. Von Hippel, F., Albright, D., Levi, B., "Stopping the Production of Fissile Materials for Weapons," *Scientific American*, September 1985.
15. Harper, Dorothy, *Eye in the Sky — Introduction to Remote Sensing*, Multiscience Publications Ltd., Montreal, 1983.
16. Bruzzi, S., Guignard, J., Pike, T., "Quality Assessment of Remote Sensing Data—the SAR Case," *ESA Journal*, Vol. 6, No. 3, 1982.
17. Rekenthaler, Douglas, "Satellite Surveillance," *Journal of Defense and Diplomacy*, Vol. 3, No. 9, September 1985.
18. de Villiers, J.N., "ESA's Plans for Future Earth Observation Programmes," *ESA Bulletin*, No. 37, Feb. 1984.

Ronald Buckingham was the project manager for the Viking ultraviolet imaging instruments and has worked in the Canadian Aerospace industry since 1971.

The views expressed in this paper are the author's own and should not be taken to represent the views of the Institute and its Board.

This paper is published by the Canadian Institute for International Peace and Security. Additional copies or other titles may be obtained from the Institute at 307 Gilmour Street, Ottawa, Ontario, K2P 0P7.

Le présent exposé est également publié en français.

GROUND PROCESSING AND CANADIAN CAPABILITIES

The art of converting data into meaningful, objective pictures or information is perhaps the most crucial element in a surveillance system. Raw data is processed, sometimes thematically, to present an illustration which best conveys the information to the analyst and the end user. Very often these pictures are not photographic replicas because false colours and stereoscopic enhancement are used to clarify meaning. Knowing the characteristics of the spacecraft, the target, and even the noise characteristics of the instrument, today's ground processing technology may use image enhancement and image restoration to produce a picture which, in many ways, overcomes the errors introduced by the sensor. Features can be highlighted to aid the interpreter, and information from different sensors can be analyzed in composite. The current development in this art is that "Artificial Intelligence"(AI) software is being used for advanced remote sensing applications. This software is designed to have human-like decision making abilities, using an "expert" knowledge base which is incorporated in the programme.[1,15]

Several Canadian companies have established worldwide markets for their Landsat image processing systems and are now marketing SPOT compatible systems. One is providing the ground system for ESA's ERS-1 satellite (previously discussed), and their most recently introduced system is at the top end of equipment available from any of the world's suppliers. Another very successful Ontario firm supplies SPOT compatible systems, including sales to China and to Sweden for their SPOT ground station at Kiruna. There are other examples. An advanced "fast" system was developed by an Ottawa firm for CCRS, and recently both a Toronto and a Montreal company introduced low cost systems which operate on a personal computer. And there are over a dozen Canadian companies who specialize in image interpretation for the various natural resource sectors.

SPACECRAFT AND GROUND STATIONS AND CANADIAN CAPABILITIES

Canada has a world class capability to design, build and integrate spacecraft and ground stations. Our largest aerospace firm provided most of the Anik series of satellites as well as Brazilsat, and has been a major contractor on other satellites such as Hermes. Along with a Western Canadian company they have also provided numerous communications satellite ground control and local receiving stations, and they are currently selling world-wide, including to Nigeria and China. And of the fourteen or so Landsat ground stations throughout the world a Canadian company has been a key participant in all but one. As part of the international Search and Rescue Satellite (SARSAT) programme, an Ottawa firm developed and is now selling the world's leading ground processing system.

Canada has been an active partner in Landsat since the programme's beginning; first by providing a ground station at Prince Albert, Saskatchewan and later adding another at Shoe Cove, Newfoundland to support both Landsat and Seasat. In May 1986, a third station was added in Gatineau, Quebec and it supports SPOT as well. The David Florida Laboratory in Ottawa is one of the most modern satellite test facilities in the world, and the Shirley Bay spacecraft control and tracking facility—at the same site—was used for all five of Canada's scientific and technology development satellites.

CONCLUSION

Satellite remote sensing technology is reaching commercial maturity and the data resolution is now close to that required for a surveillance mission.[17] By 1991 a deluge of high quality data will be available from current commercial systems such as Landsat and SPOT, from the soon-to-be launched systems like Europe's ERS-1, from Japan's SAR equipped satellite system, from the SPOT and ERS upgrades currently in planning or development[18], and possibly from selected US or even USSR national security programmes.

Canada has a mature satellite industry, an experienced remote sensing sector, solid airborne and spacecraft instrument capability, and world class ground receiving and remote sensing data processing technology. Canada also has an international reputation as being fair and able to conduct peacekeeping activities. An objective, internationally administered satellite surveillance organization would fulfill a needed world role, and it is logical to consider Canadian participation. A promising systems approach would be for the organization's technical centre to receive data from all available sources, and if necessary to augment this with data from a dedicated surveillance spacecraft system, designed and operated under the jurisdiction of the organization. The satellite's purpose would be threefold: to provide vital information not otherwise available about specific targets, to authenticate data received from other organizations, and to provide "second look" images of targets.

The most challenging task would likely be on the ground. There, all available data could be correlated, processed, analyzed and objectively interpreted.

Exposé

INSTITUT CANADIEN POUR LA PAIX ET LA SÉCURITÉ INTERNATIONALES

Numéro 7 Décembre 1986

LA SURVEILLANCE PAR SATELLITE ET LES CAPACITÉS DU CANADA

par Ronald Buckingham

HISTOIRE DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DE LA SURVEILLANCE

En 1959, le satellite américain Explorer-6 transmettait les premières photographies de la terre prises depuis l'espace. Un an plus tard, soit en avril 1960, le premier des satellites météorologiques TIROS était lancé dans l'espace et commençait à relayer des données météorologiques à la terre. Le satellite se déplaçait sur une orbite circulaire à 830 kilomètres d'altitude, ce qui est typique d'une mission de télédétection. Le TIROS-1 a duré 89 jours seulement, et ses deux caméras de télévision transmettaient des images dont la résolution était d'un kilomètre, mais il a montré clairement que l'observation de la terre par satellite offrait de formidables possibilités. À mesure que des véhicules spatiaux munis d'instruments toujours plus perfectionnés étaient lancés, la transmission de données météorologiques par satellite n'a pas tardé à devenir quelque chose de courant pour le public.

Dans le cadre du programme américain de vols spatiaux habités, les astronautes des capsules Mercure avaient pris des photos intrigantes avec des caméras manuelles; par la suite, soit en juin 1965, les astronautes J.A. McDivitt et E.H. White commencèrent à photographier la terre systématiquement depuis leur capsule Gemini. À cause de l'utilité de leurs 39 premières photographies couleurs sectionnelles à chevauchement, la NASA décida de poursuivre un programme de télédétection dans le cadre des missions Gemini, puis Apollo et Skylab.[1]

Pendant ce temps, les États-Unis et l'URSS avaient également mis au point des techniques de surveillance par satellite (le mot "surveillance" est l'équivalent militaire du terme scientifique "télédétection"), pour garantir la sécurité nationale. La surveillance aérienne avait commencé en 1859, quand on prit des photos depuis une montgolfière près de Paris. Cette nouvelle technique fut appliquée pour la première fois quelques années plus tard, pendant la Guerre de sécession aux États-Unis. La reconnaissance photographique devint une discipline spécialisée pendant les guerres ultérieures et, fait qui allait compter considérablement à l'ère encore lointaine des satellites, le radar imageur et la photographie couleurs en infrarouge furent inventés pendant la Seconde Guerre mondiale.[1] En 1956, les premiers avions américains U-2 effectuèrent des vols de reconnaissance photographique au-dessus de l'URSS, et ces missions se poursuivirent jusqu'en mai 1960, époque où Francis Gary Powers fut abattu par un missile soviétique à 70 000 pieds d'altitude. L'événement fit les manchettes, mais il demeure qu'à ce moment-là, plus de quarante avions de reconnaissance américains et alliés avaient été abattus depuis la fin des années 1940.[2] Les vols d'avions U-2 ont cessé juste au moment où la technologie des satellites commençait à s'épanouir. Or, on voyait dans ces engins des instruments plus utiles que l'avion, et ce, pour trois raisons : à l'époque, les satellites étaient invulnérables; ils pouvaient surveiller des régions plus vastes, et leur présence n'était pas aussi provocante que les vols d'avions pilotés. En mars 1955,

c'est-à-dire deux ans avant le lancement du premier Spoutnik, les États-Unis avaient amorcé, sous la gouverne de la CIA, un programme de recherches sur les techniques de surveillance par satellite. La première capsule de films renvoyée à la terre par le satellite Discoverer-13 fut récupérée le 11 août 1960. Au moment où John Kennedy accédait à la présidence, les satellites de surveillance infirmaient la thèse voulant qu'il y eut un écart entre les États-Unis et l'URSS quant au nombre de missiles existant de part et d'autre. En 1963, les appareils utilisés fournissaient déjà des photos de "surveillance de zone" et des photos en "vue rapprochée". Les Soviétiques lancèrent leur programme Cosmos à ce moment-là, et l'on peut penser qu'ils recueillaient alors de l'information d'une qualité comparable à celle des données américains. Les moyens techniques de surveillance que les deux pays se donnèrent ainsi les rassurèrent suffisamment pour les amener à amorcer les pourparlers sur la limitation des armements stratégiques (SALT) en 1969.[3]

L'évolution des techniques de surveillance et des moyens de télédétection s'est poursuivie en parallèle. Aux États-Unis, la NASA et l'Armée de l'air se sont partagées l'information, sous réserve des exigences du secret. Quant à elle, l'URSS ne divise pas ses efforts entre les secteurs civil et militaire, et elle possède donc une seule infrastructure dans ce domaine.

Dès 1971, les États-Unis plaçaient sur orbite quasi polaire des satellites de surveillance "Big Bird" de 20 000 livres; en général, ceux-ci avaient un apogée (point le plus haut de l'orbite) de 290 kilomètres, et un périgée (point le plus bas de l'orbite) de 180 kilomètres. À des altitudes aussi basses, ces gros objets rentrent rapidement dans l'atmosphère à cause de la traînée; la durée de vie des trois premiers Big Bird a été de 52, 40 et 68 jours respectivement, tandis que les engins spatiaux russes équivalents sont restés en service deux semaines chacun en moyenne! C'est pourquoi l'URSS a lancé 395 satellites de surveillance entre 1960 et 1977, comparativement à 227 du côté américain.[2] Ce serait après la lancement du satellite d'inspection "en vue rapprochée" KEYHOLE-8 (KH-8), en juillet 1966, que les États-Unis auraient décidé que les images photographiques recueillies étaient assez nettes pour leur permettre d'envisager la conclusion d'accords sur la limitation des armements. En décembre 1976, les Américains ont lancé leur premier satellite de reconnaissance photographique à imagerie électronique, le KH-11. Ce fut aussi le premier engin à pouvoir transmettre ses images à la terre par télémétrie numérique; il était muni d'un système de propulsion permettant de modifier son orbite. Il fut dès lors possible de prolonger sensiblement la durée de vie de ce modèle, et certains KH-11 ont pu rester en orbite pendant plus de deux ans.

Les Américains ont continué de lancer des satellites Big Bird et KH-11 pendant les années 1970 et jusqu'à tout récemment, quand ils ont perdu une navette spatiale et un lanceur Titan. C'est pendant cette période que les satellites géostationnaires "Rhyolite" et "Chalet" destinés à intercepter les communications sont devenus opérationnels.[4] Il est possible que les États-Unis exploitent des véhicules spatiaux munis de radars à imagerie à haute résolution, dans le cadre du programme "Clipper Bow" qui aurait démarré en 1983,[5] mais cela n'a pas été confirmé.[4] Le satellite de surveillance de la prochaine génération, le KH-12, est tellement gros qu'il emplira à lui seul la soute de la navette spatiale. Il possédera à son bord des caméras de surveillance en vue rapprochée et de zone, ainsi que des imageurs en infrarouge.[4]

Au cours des années 1970, les Soviétiques auraient déployé des satellites de surveillance qui renvoyaient leurs films à la terre; à l'heure actuelle, cependant, ils disposent d'imageurs électroniques dont les émissions sont transmises par voie numérisée à la terre. En outre, l'URSS possède deux groupes de satellites intercepteurs de communications qui évoluent sur des orbites basses.[4]

Pour des applications civiles, les États-Unis ont mis au point le *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS) vers la fin des années 1960, et le premier engin de ce genre, rebaptisé "Landsat" a été lancé en 1972.[1,6] Ce fut là le début d'un programme très réussi qui fournit aujourd'hui de l'information à des abonnés dans de nombreux pays. Par ailleurs, le véhicule Seasat lancé en 1978 a montré le potentiel du radar imageur d'océans. L'engin russe Cosmos-954 à propulsion nucléaire, qui s'est abîmé au-dessus du Canada en janvier 1978, était lui aussi muni d'un tel radar.[5] Le plus récent dispositif de télédétection est français; il s'agit du Système probatoire d'observation de la terre (SPOT) qui a été lancé en février 1986 et qui fournit les meilleures images à haute résolution qu'on puisse obtenir actuellement par voie commerciale.[6,7]

LA TECHNOLOGIE SPATIALE CANADIENNE

Le 28 septembre 1962, une fusée américaine Thor-Agena a emporté avec elle un satellite canadien depuis la base de Vandenberg, en Californie. Le Canada devenait ainsi le troisième pays dans l'espace, après l'URSS et les États-Unis. Les quatre premiers satellites Alouette et ISIS ont servi à mener des recherches scientifiques. Ils portaient des instruments semblables à des radars et appelés "son-

des par le dessus" pour étudier l'ionosphère. Tout au long des années 1970 et 1980, le Canada s'est affirmé dans le domaine de la technologie spatiale, tant au niveau gouvernemental que dans l'industrie privée des techniques de pointe. Après des travaux accomplis par le ministère de la Défense nationale (MDN), le ministère des Communications (MDC) a perfectionné des techniques propres aux satellites de communications, de sorte que le Canada s'est imposé sur la scène mondiale dans ce domaine. Télésat Canada a commencé à exploiter le premier réseau national du monde en janvier 1973, avec le lancement d'ANIK A. Pendant cette même période, le Conseil national de recherches du Canada (CNR) a soutenu la mise au point d'instruments canadiens de spatiologie et du bras télémanipulateur, il a aidé à réaliser notre programme des astronautes et à définir notre rôle dans les travaux concernant la station spatiale américaine.[8] Des universités canadiennes, telles que celles de York, de Calgary et de la Saskatchewan, ont porté à un haut niveau d'excellence nos connaissances en spatiologie, mais en tant que membre de l'OTAN et du NORAD, le Canada a compté sur les satellites américains pour ce qui est de la surveillance et de l'alerte avancée.

À cette époque également, l'activité des milieux de la télédétection s'est intensifiée au Canada, favorisée qu'elle était par les besoins de cette vaste terre riche en ressources. En mai 1971, le Canada et les États-Unis ont amorcé un programme coopératif faisant appel à des avions, puis à des engins spatiaux, pour faire de la télédétection. Au sein du gouvernement, le Centre canadien de télédétection, qui relève du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, a encouragé le développement des techniques de télédétection et favorisé la croissance de l'industrie dans quatre domaines : la mise au point d'instruments, la géodésie, le traitement des données au sol, et l'application de la télédétection dans divers secteurs de l'économie. Aujourd'hui, les produits canadiens, et en particulier les systèmes de traitement des images, se vendent dans le monde entier, et la Société canadienne de télédétection compte plus de 600 membres et est un organisme reconnu à l'échelle internationale.

Il n'existe aucune différence fondamentale entre les techniques de surveillance aux fins de la sécurité nationale et les techniques de télédétection. Les types d'instruments, les principes de conception et bon nombre des composantes sont identiques dans les deux secteurs. Les différences concernent les ordres de grandeur : les programmes de surveillance exigent habituellement une meilleure résolution, les instruments sont souvent plus gros, et il leur faut une plus forte alimentation électrique et des lanceurs plus puissants. Dans le cadre des missions de surveillance, le traitement au sol et l'analyse des données peuvent nécessiter une main-d'oeuvre plus nombreuse et plus d'équipement, et il est probable qu'il s'écoulera moins de temps entre le stade de l'acquisition des données et celui de leur analyse au sol. Dans un cas comme dans l'autre, on peut diviser les satellites d'observation terrestre en six catégories, en fonction de leur rôle :

- télédétection au-dessus de la terre et des océans à des fins scientifiques et commerciales;
- surveillance (militaire) aux fins de la sécurité nationale;
- alerte avancée;
- météorologie;
- navigation, positionnement et géodésie;
- surveillance pour la vérification du respect des traités.

LA VÉRIFICATION

En ce qui concerne les armes détruites ou visées par des accords de limitation, la vérification se ferait par les moyens techniques nationaux et grâce à des inspections sur place. L'URSS est disposée à conclure une entente sur n'importe quelle autre mesure de vérification.

Mikhail Gorbachev
16 janvier 1986[4]

Dans toutes les négociations dont le but ultime était la conclusion de traites sur la limitation des armements, l'interdiction des essais, la non-prolifération et d'autres thèmes de même ordre, la vérification a toujours été une question sous-jacente et probablement la dimension primordiale. En signant le Traité sur la limitation partielle des essais nucléaires en 1963, les États-Unis et l'URSS attestaient que les moyens techniques nationaux (MTN) avaient atteint un degré de perfectionnement tel que les deux pays estimaient pouvoir, grâce à eux, détecter toute violation du Traité. Le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires a été signé en 1968 et, en 1985, 130 pays l'avaient ratifié, y compris le Canada et trois des États munis d'armes nucléaires, à savoir les États-Unis, l'URSS et le Royaume-Uni. La Chine, la France, Israël et l'Inde n'ont pas paraphé le Traité.[9]

Au moment où elles ont signé le Traité sur la non-prolifération, les deux superpuissances ont convenu d'amorcer des négociations sur un Traité concernant la limitation des armements stratégiques (SALT). En 1972, elles ratifiaient le Traité sur les missiles anti-missiles balistiques (ABM) et l'Accord intérimaire sur la limitation des armes offensives.[2] Le traité subséquent, soit le SALT II, est entré en vigueur en juin 1979, bien que le Congrès américain ne l'eût jamais ratifié. Ce traité est officiellement venu à expiration le 31 décembre 1985, mais les

deux pays ont convenu de continuer à en respecter les clauses générales. Aux termes du SALT II, les États-Unis et l'URSS se sont entendus sur des limites applicables à des types particuliers d'armes, en s'inspirant du protocole de Vladivostok intervenu en 1974 entre le Président Carter et le Secrétaire Brejnev. Des plafonds numériques visaient aussi les vecteurs nucléaires stratégiques tels que les bombardiers lourds, les missiles balistiques intercontinentaux (ICBM), les missiles balistiques lancés depuis un sous-marin (SLBM), et les missiles air-surface.[2,3,10]

Les moyens techniques de vérification incluent les satellites de surveillance, la surveillance aérienne, les postes d'écoute et les instruments terrestres tels que les détecteurs sismiques et les radars. Au nombre des moyens non techniques, il faut compter les inspections sur place et d'autres méthodes, dont les analyses économiques, l'étude des documents et des discours, les entrevues avec des voyageurs et des immigrants, et les activités clandestines. La formule la plus fiable consiste à recueillir de l'information auprès de nombreuses sources différentes.

La question de la vérification technique sous-tend quatre grands aspects : les limites physiques de la technologie, la capacité de détecter les activités que l'adversaire cherche intentionnellement à dissimuler, les mesures de protection à prendre si l'une des parties essaie de confondre ou de détruire le réseau de surveillance de l'autre, et enfin (et c'est sans doute la tâche la plus difficile), l'interprétation objective des données.

Beaucoup d'arguments militent en faveur de la création d'un programme impartial de surveillance, qui serait administré et mené par des personnes venant de pays autres que les deux superpuissances. On a réclamé une telle structure à maintes reprises. Ainsi, pendant la Session extraordinaire de l'ONU sur le désarmement, en 1978, la France a proposé de mettre sur pied l'Agence internationale de satellites de contrôle (ISMA) et de la placer sous l'égide de l'ONU.[11] Dans un même ordre d'idées, l'amiral américain Stansfield Turner, ancien directeur de la CIA, a recommandé en 1985 que les États-Unis diffusent plus largement l'information recueillie grâce aux moyens techniques de surveillance. Citant une proposition formulée par le président Eisenhower en 1955, il a même évoqué la possibilité de créer une "agence de l'espace aérien sans frontières".[12] Même en l'absence d'une telle agence, nous connaissons déjà l'existence et les capacités générales de certains satellites américains de surveillance, renseignements qui, il y a à peine quelques années, étaient tous confidentiels. Six pays, nommément l'Argentine, la Grèce, l'Inde, le Mexique, la Suède et la Tanzanie, ont offert d'administrer ensemble un programme international de contrôle.[4] Au Canada, le ministère des Affaires extérieures parraine une étude sur le déploiement possible d'un système de vérification au sol et dans l'espace qui s'appellerait PAXSAT. Bien qu'elle ne soit pas encore terminée, l'étude recommandera probablement le lancement d'un satellite canadien muni d'imageurs et d'un radar à haute résolution et la mise en place d'un système au sol hautement perfectionné.[13]

QUOI ET QUI OBSERVER?

Comme les traités SALT concernaient les menaces stratégiques, les "cibles" tels que les missiles ICBM et SLBM, les avions stratégiques et les rampes de lancement constituaient les principaux objets de la vérification. (Le mot "cible" est ici employé sans allusion malveillante, pour décrire l'objet observé.) Un programme de vérification plus complet comprendrait l'observation de nombreux autres éléments, dont les navires de guerre, les stations radar, les usines et les entrepôts d'armes chimiques et biologiques, les installations militaires, les véhicules militaires terrestres et les usines d'armements en construction. Il importerait aussi de déceler les changements survenus entre un "balayage satellite" et le suivant, pour suivre toute évolution dynamique des choses. Il conviendrait en outre d'observer les missiles de croisière. Avec les techniques actuelles de télédétection, il est possible de les surveiller au sol, mais vu leur mobilité et leur petite taille, il est facile de les cacher dans des bâtiments ordinaires. En outre, ces missiles n'ont pas besoin d'un "soutien logistique" considérable, contrairement aux ICBM. Par conséquent, la vérification à cet égard suscite des controverses, et c'est sans doute une question qu'on ne pourra pas régler seulement par le biais des moyens techniques.[4,10] On a aussi proposé d'observer un certain nombre d'autres cibles; par exemple, on pourrait observer les réacteurs nucléaires et les usines d'enrichissement de l'uranium pour confirmer que les pays respectent les limites de production de matières fissibles destinées aux armes nucléaires.[14]

Les satellites munis d'antennes à grand gain et de récepteurs sensibles capables de couvrir une vaste partie du spectre des fréquences de communications peuvent intercepter les communications sol-sol et sol-espace, ou encore les capter "par indiscrétion". Un organisme international de vérification pourrait techniquement assumer un tel rôle, mais à moins que toutes les parties intéressées, y compris les deux superpuissances, acceptent un contrôle de ce genre, on aurait là une formule peu pratique du point de vue diplomatique. En outre, on se heurterait à des défis techniques de taille, vu le degré de perfectionnement exigé du matériel et des res-

sources nécessaires pour traiter et décoder les données.

Quiconque voudra élaborer un réseau de surveillance pour la fin des années 1980 et la décennie ultérieure devra prendre en compte le fait que la conjoncture ayant abouti aux traités des années 1960 et 1970 n'est plus la même. Il importe toujours autant de s'assurer que les États-Unis et l'URSS respectent les traités sur la limitation des armements stratégiques et l'interdiction des essais, mais il faut aujourd'hui se soucier d'autres aspects également. De nombreux pays et groupes disposent de moyens plus considérables qu'autrefois pour provoquer une crise mondiale par une action militaire limitée, un accroissement de leurs arsenaux, des manoeuvres de guérilla et le terrorisme. C'est pourquoi le réseau de surveillance devrait pouvoir observer toutes les régions du monde, et la présentation, l'interprétation et la diffusion objectives des données revêtraient une importance capitale.

QUELLES DONNÉES ET QUEL POUVOIR DE RÉSOLUTION FAUT-IL?

Afin d'exécuter certaines tâches de surveillance, il suffit simplement de détecter la présence d'un objet ou d'une activité; dans d'autre cas, cependant, il faut identifier la cible, voire en évaluer les dimensions. Le tableau 1 indique le pouvoir de résolution au sol (en mètres) nécessaire pour distinguer diverses cibles, en fonction de la nature de la tâche à accomplir.[2]

TABLEAU 1 Pouvoir de résolution nécessaire pour exécuter diverses tâches de vérification

	TÂCHE		
CIBLE	*Détection*	*Identification générale*	*Description*
Radars	3	1	0,15
Avions	5	1,5	0,15
Navires	8	5	0,3
Véhicules	1,5	0,6	0,06
Routes	9	6	0,6
Sous-marins	30	6	0,6
Missiles ICBM	3	1,5	0,3
Missiles SLBM	30	6	1
Missiles de croisière (estimation)	1,5	0,6	0,06

L'observation de mouvements de troupes, surtout s'il s'agit de petits groupes, nécessite un plus haut pouvoir de résolution que pour des véhicules. Dans le cas de nombreuses cibles, la résolution "spectrale" (capacité de faire la distinction entre des longueurs d'onde particulières de la lumière ou d'autres rayonnements électromagnétiques) importe tout autant que la résolution "spatiale" au sol. Les détecteurs infrarouges doivent pouvoir relever les variations de température utiles, et cela suppose normalement la capacité de distinguer des fluctuations de quelques degrés seulement.

COMPOSANTES FONDAMENTALES D'UN RÉSEAU DE SURVEILLANCE PAR SATELLITE

Tout réseau de vérification comporte six éléments clefs :

- les satellites,
- la station de commande et de pistage des satellites,
- la station de réception des données,
- le centre de traitement des données,
- le groupe d'analyse et d'interprétation,
- le réseau de diffusion de l'information.

Le nombre de satellites et le choix des orbites dépendent de l'importance relative accordée à la couverture, à la résolution, à la durée de vie du système et au coût. Pour les missions de surveillance, on a la plupart du temps eu recours à des orbites polaires, parce qu'elles permettent de "balayer" toute la surface du globe. Tout dépendant de l'altitude de l'orbite et du (des) champ(s) optique(s) des instruments, il faut normalement compter plusieurs jours, voire des semaines, pour tout observer. D'autres orbites, telles que les orbites équatoriales et les orbites elliptiques inclinées, sont préférables pour répondre à certains besoins particuliers. Ainsi, l'URSS place fréquemment ses satellites sur des orbites de type "Molniva" : elles sont elliptiques et inclinées à soixante-cinq degrés environ et elles ont leur apogée au-dessus de l'hémisphère Nord. Ces trajectoires offrent aussi une bonne vue des régions septentrionales. À mesure que le nombre de satellites croît, le temps entre les observations d'une même cible diminue et, tout dépendant des orbites choisies, il est dès lors possible de mieux couvrir la surface terrestre. Si l'altitude est moindre, la résolution s'améliore, mais la largeur du couloir balayé à chaque passage et la durée de vie du satellite diminuent, et ce, quelle que soit l'orbite. Comme nous l'avons déjà dit, les satellites de reconnaissance photographique évoluent sur des orbites très basses et ont une courte durée de vie, mais ils peuvent prendre des images dont la résolution est inférieure à dix centimètres. À l'autre extrême, les satellites géostationnaires gravitant sur des orbites de 36 000 kilomètres (on s'en sert pour la météorologie, l'alerte avancée, la navigation et les communications) couvrent presque toute la terre, mais la résolution des images transmises est de l'ordre d'un kilomètre.

Un satellite simple muni d'instruments ordinaires peut coûter de cinquante à cent millions de dollars,

et les frais de lancement vont se situer dans la même gamme, mais il faudra s'attendre à des montants beaucoup plus élevés s'il s'agit de satellites portant des instruments complexes (de grosses antennes radar, par exemple). Ainsi, le prix d'un KH-11 atteint, semble-t-il, les cinq cents millions de dollars américains.[4] L'énergie électrique nécessaire influe énormément sur la taille et le coût d'un satellite. Les gros instruments peuvent consommer des milliers de watts que leur fourniront habituellement de grands panneaux solaires ou des réacteurs nucléaires. En outre, les satellites de surveillance doivent être minutieusement stabilisés, car la stabilité influe sur la résolution des instruments. Il faut donc souvent équiper les gros véhicules spatiaux de systèmes complexes et coûteux de contrôle d'attitude.

Les missions de surveillance permettent de recueillir beaucoup de données brutes. Par exemple, le système SPOT transmet par télémétrie 50 mégabits par seconde. Une fois les données parvenues au sol, on emploie des logiciels spécialisés pour leur donner une forme utile. Tout dépendant de l'application envisagée, on pourra avoir besoin pour cela aussi bien d'un ordinateur personnel que d'un gros processeur cellulaire ultrarapide. De nombreuses tâches de surveillance n'exigent pas que les données soient traitées en "temps quasi réel", contrairement à ce qu'il faut faire avec les données transmises par les satellites d'alerte avancée.

L'analyse et l'interprétation revêtent une importance critique, et les techniques mises au point pour la télédétection peuvent aussi servir à la surveillance et à la vérification. Comme nous l'avons déjà souligné, le recours à divers instruments, à des modes de fonctionnement multiples et à des moyens variés de vérification technique et non technique favorise une interprétation très objective et précise. Une fois les données traitées, il faut les transmettre efficacement ou les fournir sur demande aux personnes et organismes qui en ont besoin. Des projets scientifiques, tels que le CANOPUS du CNR, ont montré que des réseaux informatiques spécialisés donnent de bons résultats. Et l'on peut se servir d'un canal exclusif sur un satellite de télécommunications (Anik, par exemple) pour acheminer les données d'un ordinateur à un autre.

DÉTAILS FONDAMENTAUX SUR LES INSTRUMENTS D'OBSERVATION DE LA TERRE

Les instruments installés à bord des satellites et des avions ressemblent à ceux qu'on emploie au sol. Ce sont principalement les détails de conception et les matériaux choisis qui diffèrent, et non les principes de fonctionnement. Presque tous les appareils de télédétection jouent leur rôle en percevant un rayonnement électromagnétique sous une forme ou une autre, que ce soit la lumière visible, les rayons infrarouges ou les signaux de télécommunications. Ces ondes électromagnétiques porteuses d'énergie voyagent toutes à la même vitesse dans le vide spatial, soit à la vitesse de la lumière (3×10^8 mètres par seconde). On peut donc dire qu'une onde se déplace dans l'espace tout en oscillant suivant une courbe sinusoïdale.

Il existe un rapport simple entre la fréquence* d'une onde et sa longueur** :

$$\text{Longueur d'onde} = \frac{\text{vitesse de la lumière}}{\text{fréquence}}$$

Par conséquent, comme la vitesse de la lumière est constante, on peut décrire avec tout autant de clarté une onde électromagnétique donnée—un signal radio, par exemple—en précisant sa longueur ou sa fréquence.

Le tableau 2 montre les zones du spectre électromagnétique classées en fonction de la longueur d'onde et des types d'instruments qu'on emploie pour la surveillance et la télédétection :

TABLEAU 2 Le spectre électromagnétique et certains instruments types

Onde	*Longueur d'onde*	*Instruments*
Radio	10 km-20 cm	Récepteurs, sondeurs
Micro-onde	20 cm-0,1 cm	Récepteurs, radars, sondeurs, radiomètres, diffusiomètres
Infrarouge	1 cm-0,75 μ	Imageurs, détecteurs, radiomètres
Visible	0,75 μ-0,4 μ	Appareils optiques, lasers, lidars
Ultraviolet	0,4 μ-3 nm	Imageurs, spectromètres
Rayons X	3 nm-0,03 nm	Détecteurs, spectromètres
Rayons gamma	1 nm et moins	Détecteurs, spectromètres

*La fréquence est le nombre de cycles d'une onde pendant une période donnée; le mot "hertz" désigne un cycle par seconde. Les préfixes "kilo-", "méga-" et "giga-" employés avec le mot "hertz" signifient respectivement un millier (10^3), un million (10^6) et un milliard (10^9) de hertz.

**La longueur d'onde, c'est la distance physique couverte par un cycle complet d'une onde qui se propage; elle s'exprime habituellement en unités métriques telles que le mètre, le centimètre (cm) et le kilomètre (km). Un millimètre (mm) équivaut à un millième (10^{-3}) de mètre, un micron (10^{-6}), à un millionième de mètre, et un nanomètre (10^{-9}), à un milliardième de mètre.

Du point de vue purement physique, les instruments employant des longueurs d'onde plus grande qu'un millimètre environ sont principalement des appareils "électroniques", et ils interceptent ou émettent des signaux grâce à des antennes; si les longueurs d'onde se situent entre un millimètre et cinquante nanomètres à peu près, on parle surtout d'instruments "optiques" faisant appel à des techniques d'optique géométrique et à la diffraction. Sous le seuil des cinquante nanomètres, les appareils fonctionnent selon les principes de la physique des particules; ils observent les interactions entre le capteur même et des ondes ou particules bien déterminées. Pour observer la surface de la terre depuis un satellite, on ne peut employer que les ondes non absorbées par l'atmosphère. Ces ondes appartiennent à des zones du spectre qu'on décrit souvent comme étant des "fenêtres". La lumière visible, les rayons infrarouges (longueur d'onde d'environ dix microns), la plupart des micro-ondes et les ondes plus longues de l'ultraviolet passent toutes par ces "fenêtres".[15]

On pourrait classer les instruments de la façon suivante :

- détecteurs ou imageurs;
- appareils actifs ou passifs.

Un *détecteur* capte les rayons électromagnétiques d'une certaine intensité ayant telle ou telle longueur d'onde, mais il ne fournit aucun détail spatial. On peut cependant exploiter le mouvement du satellite ou de l'avion afin de créer des images à faible résolution, et cela suffit pour accomplir bien des tâches de surveillance. Parmi les détecteurs, citons ici le radiomètre, à titre d'exemple. Un *imageur* est en quelque sorte un détecteur qui obtient aussi des détails explicites sur les caractéristiques dimensionnelles de la cible, détails qu'on peut ensuite convertir en images. Une caméra appartient à la catégorie des imageurs.

Les instruments passifs interceptent des ondes provenant indépendamment de la cible. Dans cette catégorie, on retrouve les caméras, les télescopes, les radiomètres et les spectromètres, par exemple. Quant à eux, les instruments actifs émettent d'abord une onde vers la cible, puis ils captent l'écho que celle-ci renvoit et qui fournit l'information voulue. Les radars, les lidars et les sondeurs électromagnétiques, pour ne citer que ceux-là, sont des capteurs actifs.

LES INSTRUMENTS DÉPLOYÉS DANS L'ESPACE ET LES CAPACITÉS DU CANADA

Instruments optiques—Spectre visible

Cette catégorie comprend notamment les télescopes, les caméras, les spectromètres et les interféromètres. La résolution est définie comme étant le plus petit intervalle au sol que l'instrument peut discerner. Le pouvoir de résolution est habituellement limité par la capacité de la surface sensible de distinguer les détails, quel que soit le degré de précision des éléments optiques. Pour l'imagerie électronique, on emploie des dispositifs à couplage de charge (CCD) ou des micro-circuits semblables à semi-conducteurs. Un CCD s'apparente à la rétine, et sa surface sensible compte environ un million de facettes distinctes appelées "pixels" et organisées pour former une matrice rectangulaire. La résolution de ces instruments dépend des dimensions du pixel qui mesure généralement entre cinq et trente microns. De la même manière, dans une caméra ordinaire, c'est le "grenu" de la pellicule qui limite la résolution.

La résolution spatiale (r) d'un instrument optique est fonction de quatre éléments distincts, à savoir la distance entre l'objet et la surface sensible (h) de l'instrument, la taille des pixels ou le grenu de la pellicule, la taille (d) de l'objet, et la distance focale (f), selon la formule géométrique suivante :

$$r = \frac{h \times d}{f}$$

Par exemple, si un satellite de vérification est placé en orbite à 400 kilomètres d'altitude et qu'on y installe un dispositif CCD dont les pixels mesurent 10 microns, alors la résolution sera d'un mètre moyennant une distance focale de 4 mètres. C'est là une grande distance focale, mais elle est réalisable, car elle est conforme à celles qu'on retrouve à bord des satellites espions actuels. Si l'on employait des "appareils optiques repliés", la longueur physique totale serait moindre. Les variations de l'atmosphère terrestre, les effets spectraux, les pertes par réflexion et d'autres phénomènes encore limitent en fait la résolution qu'il est possible d'obtenir, géométriquement parlant.

Le Canada possède des centres de recherche industriels, universitaires et gouvernementaux dans le domaine de l'optique. Ainsi, un certain nombre d'entreprises privées fabriquent des appareils optiques de précision, et plusieurs universités (l'université Laval, à Québec, par exemple) sont très connues à cause des recherches qu'elles mènent dans cette discipline. L'Observatoire Dominion du CNR, situé à Victoria, compte parmi les établissements qui ont mis au point des systèmes optiques complexes basés au sol; citons notamment un laser dirigé vers la lune, un système astronomique portatif destiné à l'Arabie saoudite, et la participation à un projet canado-franco-américain portant sur la construction d'un télescope de 3,6 mètres sur le mont Mauna Kea, à Hawaii. En vertu d'un contrat obtenu du CNR, une société d'Ottawa a créé une caméra perfectionnée à dispositif CCD sensible aux

rayons ultraviolets (UV), pour l'engin spatial suédois Viking qui, après avoir été lancé en février 1986, produit maintenant les images de l'ultraviolet les plus détaillées jamais obtenues dans l'aurore boréale. À l'heure actuelle, une société de l'Ouest canadien travaille sur un interféromètre imageur doppler grand angle Michaelson (WAMDII) que la navette emportera à l'occasion d'une mission scientifique. Deux entreprises ontariennes collaborent avec la France pour construire un gros interféromètre imageur des vents (WINDII) qui sera monté par la NASA à bord de son satellite de recherches sur la stratosphère (UARS); ce satellite doit être lancé par la navette ou une fusée Titan vers la fin des années 1980.[6] De nombreuses sociétés canadiennes vendent des instruments optiques destinés à des dispositifs terrestres ou aériens.

Radar à antenne synthétique (SAR)

Un radar imageur diffère d'un radar de détection du fait que le faisceau transmis est relativement étroit et que l'onde réfléchie par la cible est captée par l'antenne de façon telle qu'on obtient une image de l'objet visé. La résolution d'un radar imageur conventionnel dépend de la longueur d'onde de l'énergie émise, de la longueur de l'antenne, et de la distance séparant l'antenne et la cible. On s'est beaucoup servi des radars aéroportés à balayage latéral (SLAR) pour les travaux de télédétection. Cependant, ce type de radar imageur ne convient pas à un satellite, car les antennes devraient s'étendre sur des kilomètres pour permettre l'identification des cibles conformément aux exigences des missions de surveillance. Le radar à antenne synthétique contourne cette difficulté grâce à une ingénieuse méthode de traitement des signaux par laquelle on utilise le décalage Doppler de l'écho radar dans une équation prenant en compte la vitesse et la position de l'engin spatial; dès lors, la longueur ou l'ouverture de l'antenne semble nettement plus grande qu'elle ne l'est en réalité. Un véhicule spatial de surveillance muni d'un SAR dont l'antenne mesurerait de dix à vingt mètres de long pourrait exécuter de nombreuses tâches de surveillance, car la résolution des images serait de l'ordre d'un à cinq mètres.[4]

Les ondes radar pénètrent les nuages, et les instruments peuvent servir de nuit comme de jour. Le SEASAT A a été le premier SAR à confirmer le potentiel d'un satellite imageur d'observation de la terre; pendant sa courte période de vie, l'engin nous a fourni une foule de données sur les caractéristiques des océans. À l'heure actuelle, le Japon et l'Europe s'affairent à mettre au point un radar à antenne synthétique devant être déployé dans l'espace pour la réalisation de travaux commerciaux de télédétection.

Le tableau 3 décrit brièvement plusieurs missions SAR dignes de mention :[1,6]

TABLEAU 3 Satellites munis de radars à antenne synthétique (SAR)

Mission	*Caractéristiques du radar*
Le SEASAT de la NASA lancé en juin 1978 et mis en orbite à 800 km d'altitude; il a cadré toutes les 36 heures 95 p.100 de la surface des océans de la planète.	Radar SAR travaillant dans la bande L et muni d'une antenne de 2,1 m sur 10,7 m offrant une résolution de 25 m sur 6 m le long d'un couloir de balayage de 100 m de largeur.
Le radar imageur SIR-A déployé par la navette Columbia en 1981.	Radar SAR SEASAT modifié muni d'une antenne de 9,4 m offrant une résolution de 40 m.
Le satellite ERS-1 qui doit être lancé en 1989 par l'Agence spatiale européenne et mis en orbite à 777 km d'altitude pour couvrir toute la terre toutes les 36 heures.	Radar SAR travaillant dans la bande C et nécessitant une puissance de crête de 4,8 kW; il est muni d'une antenne de 1,0 m sur 10 m offrant une résolution de 40 m.
L'engin japonais ERS-1 (même nom que le précédent) devant être mis sur orbite circulaire à 570 km d'altitude en 1991.	Radar SAR exigeant une puissance de 1,0 kW et muni d'une antenne de 2,4 m sur 12 m qui offre une résolution de 25 m.

Au cours des dix dernières années, le Canada a préparé le Radarsat qui devait être un satellite de télédétection muni d'un radar à antenne synthétique. En général, les études recommandaient une orbite circulaire fortement inclinée à une altitude de 800 à 1 000 kilomètres, un radar SAR fonctionnant à 5,3 gigahertz (bande C***), et une résolution au sol d'environ 25 mètres avec un couloir de balayage d'à peu près 200 kilomètres, des faisceaux multiples et une antenne orientable.[6] En mai 1986, le ministre des Sciences et de la Technologie a annoncé que le gouvernement allait cesser d'accorder son appui financier au programme et il a demandé à l'industrie privée d'élaborer une stratégie de financement. Celle-ci est maintenant en voie de préparation. Par ailleurs, les modèles et les techniques qui ont été mis

***La bande L comprend les micro-ondes dont la longueur d'onde se situe aux environs de 20 centimètres, et la bande C, celles dont la longueur d'onde est d'environ 5 centimètres.

au point serviront aussi dans le cadre de programmes dérivés, y compris ceux portant sur la création d'appareils de vérification. Le Radarsat mis à part, le Canada participe au programme ERS-1 de l'Agence spatiale européenne en lui fournissant le système de traitement au sol qui équipe le SAR.

Dans le domaine des dispositifs aéroportés, le Centre canadien de télédétection (CCT) a adjugé un contrat à une société de la Colombie-Britannique pour qu'elle mette au point un des premiers systèmes SAR canadiens; l'appareil est actuellement monté sur l'avion de recherche *Convair 580* du Centre.[16] Les radars aéroportés à balayage latéral (SLAR) ont été considérablement employés au Canada, et un certain nombre d'entreprises commerciales ont élaboré des méthodes d'application à cet égard et fournissent des services aéroportés de télédétection. D'autres sociétés canadiennes conçoivent et construisent des SLAR à haut rendement qui comptent parmi les meilleurs au monde.

Analyseurs multispectraux (MSS)

Ces appareils constituent les éléments clefs de la technologie actuelle des satellites de télédétection. Ce sont en fait des caméras électroniques qui fonctionnent dans le spectre visible et jusqu'au proche infrarouge, en employant un certain nombre de bandes spectrales discrètes. On met à profit le mouvement du satellite ou de l'avion pour balayer le champ visuel de l'analyseur au-dessus de la cible. Il est également possible d'utiliser un miroir de balayage. La cible est photographiée simultanément dans chaque bande et, après le traitement des données, on produit une image en couleurs réelles. Très souvent, on recourt aux fausses couleurs pour faciliter l'interprétation.

Les premières analyses multispectrales commerciales effectuées par satellite remontent à l'époque du Landsat A. Les images du Landsat nous sont familières, à cause de leur beauté; en effet, elles figurent souvent dans des magazines tels que le *National Geographic*. La NASA s'est délestée de ce programme en confiant la direction à la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), mais au cours de l'année dernière, c'est une société privée, l'EOSAT, qui en a pris la gouverne. Le Landsat D, qui est le plus récent de la série, possède un MSS à quatre bandes couvrant les zones de la lumière visible; il est également muni d'un nouveau type d'analyseur multispectral appelé "cartographe thématique", qui est expressément conçu pour mettre en évidence des catégories particulières de cibles, telles que les cultures, les forêts, etc. La résolution du MSS monté sur le Landsat aurait pu être meilleure, semble-t-il, mais le Pentagone a imposé des restrictions à la NASA.[4]

Le programme français SPOT a été conçu comme une entreprise commerciale dès l'origine, après que le gouvernement eut consenti à cet égard un investissement initial irrécouvrable.[7] Le SPOT offre une résolution au sol plus haute que celle du Landsat, et ses deux MSS peuvent pivoter latéralement. Il peut donc produire des images stéréoscopiques de la cible, mais il n'a pas la portée spectrale du Landsat D. On s'affaire déjà à concevoir des satellites SPOT améliorés et, si l'entreprise connaît le succès commercial escompté, ces engins spatiaux seront mis en orbite au début des années 1990. Aux fins de la vérification, il convient de signaler ici que n'importe qui dans le monde peut avoir accès aux données recueillies par le SPOT et le Landsat.

Le tableau 4 détaille les caractéristiques des instruments montés sur ces deux satellites :[1,6]

TABLEAU 4 Satellites munis d'analyseurs multispectraux (MSS)

Mission	*Caractéristiques des instruments*
Landsat D de l'EOSAT lancé en mars 1984 et mis sur orbite circulaire quasi polaire, à 700 km d'altitude.	MSS à 4 bandes couvrant les longueurs d'onde de 0,5 à 1,1 micron, avec une résolution au sol de 80 m. Cartographe thématique qui est un MSS à 7 bandes couvrant les longueurs d'onde de 0,45 à 2,35 microns, avec une résolution au sol de 30 m.
SPOT français lancé en février 1986 et mis sur orbite quasi polaire à 832 km d'altitude.	Instrument à 3 bandes couvrant le spectre visible entre 0,51 et 0,89 micron; deux MSS avec une résolution de 20 m, pour l'imagerie multispectrale, et une résolution de 10 m, pour les images en noir et blanc.

Le Canada a mis au point de nombreux analyseurs aéroportés. Ainsi, le Centre canadien de télédétection a confié à contrat la création d'un balayeur imageur électro-optique (MEIS) qui, grâce à ses 1 728 éléments détecteurs tous munis d'une lentille distincte, a offert une résolution d'un mètre dans huit bandes spectrales.[15] En outre, le ministère des Pêches et Océans a adjugé un contrat portant sur la conception et la construction d'un imageur linéaire à fluorescence (FLI) qui sert actuellement à calculer les concentrations de plancton. Le modèle aéroporté est censé être le précurseur d'une version spatiale du même instrument.

Les lasers

Les lasers sont des instruments actifs qui produisent un étroit faisceau de lumière cohérente, habituellement dans le spectre visible; il existe cependant des lasers ultraviolet et infrarouges. Le laser présente un avantage du fait que le faisceau émis se disperse peu et demeure mince pendant tout son trajet. Les lidars (radars à laser) sont des instruments employés pour l'établissement des profondeurs et l'altimétrie.[6]

L'industrie canadienne montre la voie dans certains domaines, notamment en ce qui concerne les lasers commerciaux et les lasers de recherche à CO_2 et les lidars aéroportés. Une société canadienne a mis au point un bathymètre à laser dont on se sert actuellement pour dresser un profilage précis des fonds de nos eaux intérieures et côtières. Des altimètres à laser ont par ailleurs été créés. Des recherches sur les lasers ont été menées dans des laboratoires du gouvernement canadien, dont ceux du CNR et du ministère de la Défense nationale (MDN).

Les instruments à infrarouge

Les détecteurs et les imageurs à infrarouge ont de multiples applications aux fins de la vérification, notamment parce qu'ils peuvent servir de jour comme de nuit. Les États-Unis (et sans doute aussi l'URSS) les emploient pour la surveillance militaire, car ces appareils peuvent, mieux que n'importe quel autre capteur, repérer une activité ou un objet. Avec un capteur à infrarouge, il est donc possible d'observer un avion ou un missile en vol, un véhicule se déplaçant au sol, un navire évoluant en mer ou n'importe quoi qui émet suffisamment de chaleur. La NASA a lancé un satellite de cartographie des capacités thermiques (HCMM) en avril 1978; depuis une orbite située à 620 kilomètres d'altitude, son radiomètre géodésique non imageur à infrarouge a fourni une résolution d'environ 600 mètres uniquement grâce au mouvement de l'engin spatial.[1] Depuis lors, on a installé à bord des satellites des détecteurs imageurs à infrarouge qui offrent une bien meilleure résolution. Il faut cependant maintenir le détecteur à de très basses températures de façon que sa propre chaleur ne l'empêche pas de repérer celle de la cible. Le Canada n'a mis aucun instrument à infrarouge en orbite, mais il s'est beaucoup servi de ce type d'appareils pour observer depuis les airs des immeubles et des processus. Plusieurs sociétés canadiennes conçoivent et fabriquent d'excellents instruments aéroportés à infrarouge, et une entreprise de l'aérospatiale est un important fournisseur de capteurs militaires à infrarouge destinés aux navires.

Les instruments à ultraviolet

Ces instruments ne sont pas très utiles pour les missions de surveillance, car l'atmosphère terrestre absorbe les ondes UV plus courtes. Cependant, certains processus physiques donnent lieu à des ondes UV plus longues qu'il est possible de détecter. Le Canada a construit des instruments terrestres à UV, notamment à l'Université de la Saskatchewan; comme nous l'avons déjà signalé ailleurs, c'est l'industrie canadienne qui a mis au point les excellentes caméras UV qui équipent le satellite suédois Viking.

TRAITEMENT AU SOL ET CAPACITÉS DU CANADA

La conversion des données en images ou en renseignements objectifs et significatifs représente sans doute le volet le plus fondamental de tout système de surveillance. On traite les données brutes, parfois suivant une formule thématique, pour en arriver à l'illustration expliquant le mieux l'information à l'analyste et à l'utilisateur final. Très souvent, ces images ne sont pas des reproductions photographiques, car on recourt aux fausses couleurs et à l'enrichissement stéréoscopique pour clarifier les détails. Si l'on connaît les caractéristiques de l'engin spatial, de la cible et même du bruit dégagé par l'instrument, les dispositifs actuels de traitement au sol peuvent appliquer les techniques de l'amélioration et de la restauration d'images pour produire une illustration qui, à bien des égards, élimine les erreurs introduites par le capteur. On peut mettre des détails en évidence pour aider l'interprète, ou encore analyser conjointement l'information fournie par différents capteurs. Le fait récent le plus important, c'est qu'on emploie maintenant l'intelligence artificielle pour exécuter des travaux complexes de télédétection. Les logiciels utilisés rendent l'ordinateur capable d'un processus décisionnel assimilable à celui du cerveau humain, grâce à une base de connaissances spécialisées qui est intégrée au programme.[1,15]

Plusieurs sociétés canadiennes vendent partout dans le monde leurs systèmes de traitement des images Landsat et elles sont maintenant en train de commercialiser des systèmes compatibles avec le SPOT. L'une d'elles fournit le système au sol pour le satellite ERS-1 de l'Agence spatiale européenne (voir plus haut), et son plus récent dispositif l'emporte sur tous les autres offerts ailleurs dans le monde. Une autre entreprise ontarienne très prospère vend des systèmes compatibles avec le SPOT, notamment à la Chine et à la Suède (station terrestre du réseau SPOT, à Kiruna). Et il y a bien d'autres exemples. Une maison d'Ottawa a mis au point pour le Centre canadien de télédétection un système "ra-

pide" perfectionné, tandis que deux entreprises de Toronto et de Montréal viennent de présenter des systèmes peu coûteux qui fonctionnent avec un ordinateur personnel. Enfin, il existe une dizaine de sociétés canadiennes qui se spécialisent dans l'interprétation des images pour les diverses industries s'intéressant aux ressources naturelles.

LES ENGINS SPATIAUX, LES STATIONS TERRESTRES ET LES CAPACITÉS DU CANADA

Le Canada a acquis des capacités de calibre mondial pour concevoir, construire et relier des engins spatiaux et des stations terrestres. Notre plus grande société aérospatiale a fourni la plupart des satellites Anik et le Brazilsat, et elle a été au nombre des principaux entrepreneurs chargés de fabriquer d'autres satellites tels que le Hermes. En collaboration avec une société de l'Ouest canadien, elle a aussi fourni de nombreuses stations réceptrices locales et stations terrestres de commande de satellites de communications, et elle vend aujourd'hui ses produits partout dans le monde, y compris au Nigéria et en Chine. Par ailleurs, une entreprise canadienne a joué un rôle déterminant dans l'établissement des quelque quatorze stations terrestres Landsat disséminées dans le monde, sauf une. Dans le cadre du programme international de recherche et de sauvetage par satellite (SARSAT), une maison d'Ottawa a mis au point et vend maintenant le système de traitement au sol le plus perfectionné au monde.

Le Canada participe activement au programme Landsat depuis ses tout débuts; il a d'abord érigé une station terrestre à Prince Albert (Saskatchewan) et il en a installé une autre, plus tard, à Shoe Cove (Terre-Neuve), pour appuyer les opérations des réseaux Landsat et Seasat. En mai 1986, une troisième station a été construite à Gatineau (Québec) et elle contribue en plus au fonctionnement du SPOT. À Ottawa, le laboratoire David Florida constitue l'un des centres d'essai de satellites les plus modernes au monde; par ailleurs, le poste de commande et de pistage des véhicules spatiaux aménagé au même endroit, soit à Shirley Bay, a servi à guider et à diriger les cinq satellites canadiens de recherches scientifiques et technologiques.

CONCLUSION

La technologie de la télédétection par satellite est presque parvenue à maturité du point de vue commercial, et le pouvoir de résolution des appareils est bien près de celui qu'exigent les missions de surveillance.[17] D'ici 1991, un déluge de données de haute qualité proviendra des systèmes commerciaux existants, tels que le Landsat et le SPOT, mais aussi des véhicules devant être lancés bientôt : l'ERS-1, le satellite japonais muni d'un radar à antenne synthétique, les versions améliorées du SPOT et de l'ERS qui en sont maintenant aux stades de la planification ou de la mise au point,[18] et peut-être aussi les engins qui verront le jour à la faveur de programmes de sécurité nationaux américains ou soviétiques.

Le Canada possède une industrie des satellites expérimentée, des spécialistes de la télédétection, de solides compétences dans le domaine des instruments spatiaux et aéroportés, et une technologie de calibre mondial en ce qui concerne la réception au sol et le traitement des données obtenues par télédétection. En outre, son objectivité et sa capacité de mener des opérations de maintien de la paix lui ont valu une réputation internationale.

La mise sur pied d'un organisme international et impartial de surveillance par satellites répondrait à un besoin on ne peut plus réel, et il est logique de penser que le Canada en ferait partie. Une des solutions prometteuses consisterait à faire en sorte que le centre technique de l'organisme reçoive des données de toutes les sources existantes, données auxquelles s'ajouteraient, le cas échéant, celles qui proviendraient d'un satellite spécialisé de surveillance conçu et exploité sous la gouverne de l'organisme en question. Le satellite aurait trois grands rôles : fournir sur des cibles bien précises des renseignements vitaux impossibles à obtenir autrement, confirmer la validité des données reçues d'autres organismes, et offrir des "images-contrôles" des cibles.

Cependant, ce serait sans doute au sol que se trouverait le défi le plus formidable à relever, car c'est là qu'il faudrait mettre en corrélation, traiter, analyser et interpréter les données objectivement.

NOTICES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Colwell, Robert N. (sous la dir. de), *Manual of Remote Sensing*, vol. 1, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginie, 1983.
2. Potter, William C., *Verification and SALT*, Westview Press, Boulder, Colorado, 1980.
3. Greenwood, T., "Reconnaissance and Arms Control", *Scientific American*, février 1973.
4. Adam, John A. et coll., Compte rendu spécial, "Verification: Peacekeeping by Technical Means", IEEE *Spectrum*, vol. 23, nº 7, juillet 1986.
5. Bertram, Christoph, *Arms Control and Military Force*, International Institute for Strategic Studies, Gower Publ. Co., R.-U., 1980.
6. Schnapf, Abraham (sous la dir. de), *Monitoring Earth's Ocean, Land and Atmosphere from Space: Sensors Systems and Applications*, vol. 97, dans la série de l'AIAA : *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA (éd.), New York, 1985.
7. Jaques, R., Lopez, R., "Looking Down for Money", *Space Markets*, publications Interavia, été 1986, vol. 2.
8. Hartz, T., Paghis, I., *Spacebound*, Centre d'édition du gouvernement du Canada, Ottawa, 1982.
9. Epstein, William, *La non-prolifération des armes nucléaires*, Exposé nº 4 de l'ICPSI, Ottawa, 1986.
10. Hafemeister, D., Romm, J., Tsipis, K., "The Verification of Compliance with Arms Control Agreements", *Scientific American*, mars 1985.
11. Jasani, Bhupendra, "Arms Control and Conflict Observation Satellites", *Space Policy*, vol. 1, nº 4, novembre 1985.
12. Turner, Stansfield, "Opening the World's Skies for Mankind", *Space Policy*, vol. 1, nº 4, novembre 1985.
13. "PAXSAT", Brochure de SPAR Aerospace, 1985.
14. Von Hippel, F., Albright, D., Levi, B., "Stopping the Production of Fissile Materials for Weapons", *Scientific American*, septembre 1985.
15. Harper, Dorothy, *Eye in the Sky—Introduction to Remote Sensing*, Multiscience Publications Ltd., Montréal, 1983.
16. Bruzzi, S., Guignard, J., Pike, T., "Quality Assessment of Remote Sensing Data—the SAR Case", *Journal* de l'ASE, vol. 6 nº 3, 1982.
17. Rekenthaler, Douglas, "Satellite Surveillance", *Journal of Defense and Diplomacy*, vol. 3, nº 9, septembre 1985.
18. de Villiers, J.N., "ESA's Plans for Future Earth Observation Programmes", *Bulletin* de l'ASE, nº 37, février 1984.

M. Ronald Buckingham a dirigé le projet de recherche sur les instruments imageurs UV destinés aux satellites Viking; il travaille dans l'industrie aérospatiale canadienne depuis 1971.

Les opinions exprimées dans l'exposé sont celles de l'auteur et elles n'engagent en rien l'Institut ni le Conseil.

Publication de l'Institut canadien pour la paix et la sécurité internationales. Pour obtenir des exemplaires supplémentaires, prière d'écrire à l'Institut, au 307, rue Gilmour, Ottawa (Ontario), K2P 0P7.

Also available in English.